 doi:10.16380/j.kcxb.2018.05.007

不同危害状态下寄主山核桃挥发物成分的比较及桑天牛对其组分的 GC-EAD 和行为反应

马　艳[1]，史黎央[1]，赵　艺[2]，徐华潮[1,*]

（1. 浙江农林大学林业与生物技术学院，浙江临安 311300；
2. 陕西省渭南市大荔县红枣局，陕西渭南 715100）

摘要：【目的】挖掘能影响桑天牛 *Apriona germari* 行为反应的山核桃 *Juglans mandshurica* 挥发物，为筛选桑天牛的植物源引诱剂或驱避剂提供理论依据。【方法】采用动态顶空套袋法收集不同危害状态[健康(CK)以及桑天牛取食、产卵和钻蛀危害]下山核桃释放的挥发物，并利用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)、气相色谱-触角电位测量系统(GC-EAD)及 Y 型嗅觉仪分析鉴定出桑天牛成虫对其产生电生理及行为反应的挥发物。【结果】不同危害状态下山核桃释放的挥发物皆以萜烯类和芳香族化合物居多，且有多种成分相对含量存在显著性差异，其中每种危害状态下山核桃释放的挥发物都有一种或几种特有的成分。桑天牛成虫仅对不同危害状态下山核桃释放的蒎烯、乙酸叶醇酯、壬醛、α-萜品醇、丙烯酸-2-乙基己酯及正十六烷 6 种挥发物产生显著的电生理反应，对其他挥发物无反应，其中雌成虫对壬醛的电生理反应最强，而雄成虫对乙酸叶醇酯的电生理反应最强。嗅觉反应结果显示，丙烯酸-2-乙基己酯仅对桑天牛雌成虫有显著的引诱作用($P<0.05$)，而乙酸叶醇酯则仅对雄成虫有极显著的引诱作用($P<0.01$)；壬醛对桑天牛雌雄成虫均有显著的引诱作用($P<0.05$)，而 α-萜品醇则对其有显著的驱避作用($P<0.05$)。【结论】本研究结果表明，乙酸叶醇酯、壬醛和丙烯酸-2-乙基己酯对桑天牛成虫有较强的引诱作用，而 α-萜品醇则对其有较好的驱避作用。

关键词：桑天牛；山核桃；挥发物；GC-MS；GC-EAD；Y 型嗅觉仪

中图分类号：Q968　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：0454-6296(2018)05-0574-11

Comparison of volatiles released from the host *Juglans mandshurica* in different damaged states and the GC-EAD and behavioral responses of *Apriona germari* (Coleoptera: Cerambycidae) to these volatiles

MA Yan[1], SHI Li-Yang[1], ZHAO Yi[2], XU Hua-Chao[1,*] (1. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China; 2. Jujube Bureau of Dali County, Weinan, Shaanxi 715100, China)

Abstract: 【Aim】This study aims to explore the volatiles from the host plant *Juglans mandshurica*, which affect the behavioral response of the brown mulberry longhorn beetle *Apriona germari*, and to provide a theoretical basis for screening plant-originated attractants or repellents of this insect. 【Methods】Volatiles released from *J. mandshurica* in different damaged states [healthy (CK), and feeding, oviposition and boring damage by *A. germari*] were collected by using dynamic headspace adsorption, and those causing electrophysiological and behavioral responses in *A. germari* were identified

基金项目：浙江省自然科学基金项目(LY17C160005)

作者简介：马艳，女，1994 年生，安徽宿州人，硕士研究生，研究方向为昆虫化学生态学和害虫防治，E-mail：851149644@qq.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail：xhcinsect@zafu.edu.cn

收稿日期 Received：2017-11-13；接受日期 Accepted：2018-02-07

by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), gas chromatography-electrophysiological antennal detecting system (GC-EAD) and Y-tube olfactometer. 【Results】In different damaged states, the main volatiles released from *J. mandshurica* included terpenes and aromatic compounds, and significant differences existed in the relative contents of several components of them. There were one or several unique volatile components in each damaged state. However, *A. germari* adults only had significant electrophysiological responses to six volatiles, including (1*R*)-(+)-alpha-pinene, *cis*-3-hexenyl acetate, nonanal, α-terpineol, 2-ethylhexyl acrylate and hexadecane, but had no responses to the other volatiles. Female adults had the strongest electrophysiological responses to nonanal, while male adults had the strongest electrophysiological responses to *cis*-3-hexenyl acetate. The olfactory reaction showed that 2-ethylhexyl acrylate had a significant attractivity to the female adults of *A. germari* ($P<0.05$), while *cis*-3-hexenyl acetate had an extremely significant attractivity to the male adults ($P<0.01$). And nonanal had a significant attractivity to both female and male adults ($P<0.05$), while α-terpineol had a significant repellent activity to them ($P<0.05$). 【Conclusion】These results indicate that *cis*-3-hexenyl acetate, nonanal and 2-ethylhexyl acrylate show strong attractivity to *A. germari* adults, while α-terpineol shows good repellent activity.

Key words: *Apriona germari*; *Juglans mandshurica*; volatiles; GC-MS; GC-EAD; Y-tube olfactometer

桑天牛 *Apriona germari* 属鞘翅目(Coleoptera)天牛科(Cerambycidae)沟胫天牛亚科(Lamiinae),又名褐天牛、粒肩天牛。该虫在在中国大部分地区都有发现,分布范围广泛,是多种林木和果树的重要蛀干害虫(张琳等, 2011)。据报道,在浙江临安山核桃产区多数被天牛危害,其主要种类是桑天牛、星天牛 *Anoplophora chinensis* 和云斑天牛 *Batocera horsfieldi*,而且桑天牛幼虫几乎都分布在山核桃枝条部位(张冬勇等, 2017)。桑天牛幼虫长期隐蔽生活在山核桃枝条内且成虫体壁鞘翅坚硬、耐药性强,常规的物理、化学防治方法很难控制其危害。

研究表明,植物释放的挥发物对天牛能够起到引诱或者驱避作用(Paré and Tumlinson, 1999; Allison *et al*., 2004)。植物挥发物是多种微浓度的挥发性化合物组成的复杂混合物,主要是一些分子量在 100 ~ 200 g/mol 的短链碳氢化合物及其衍生物,包括烃类、醇类、酯类、醛类、酮类、有机硫、含氮化合物、芳香类化合物、有机酸以及萜烯类等化合物(严善春等, 2003)。植物释放的挥发物化学成分及比例的变化是构成特定化学信息联系的基础,称为化学指纹图谱(chemical fingerprint)(Pichersky and Gershenzon, 2002)。化学指纹图谱可以调控昆虫定向选择、昆虫产卵、昆虫取食、昆虫交配及昆虫趋向性等行为(王红伟等, 2014)。如云斑天牛对寄主山核桃 *Carya cathayensis* 和白蜡树 *Fraxinus chinensis* 挥发物中的壬醛具有明显触角电位反应(张冬勇等, 2016)。每种植物在自然状态下释放出的挥发物一般不超过 30 种,但植物组织受到植食性昆虫攻击或者人为损伤后其挥发物的成分构成和相对含量会产生明显的改变(Mulle and HIIker, 2000)。虫害诱导下植物挥发物也可以调控植食性昆虫的行为,植食性昆虫通过识别其挥发物的成分和浓度辨别寄主植物的生理状态,进而做出相应的反应(杨桦等, 2011)。如复叶槭 *Acer negundo* 受到机械损伤或天牛咬食损伤后对光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* 产生了驱避作用,而健康复叶槭所释放的挥发物则具有明显的引诱作用(李继泉等, 2003)。随着化学生态学的迅速发展,国内外学者对昆虫和植物之间的化学联系越来越重视,故可以从化学生态学方向来研究如何防治桑天牛。

目前对山核桃挥发物研究不多,尤其是对不同虫态桑天牛危害下寄主山核桃挥发物的研究更为有限,并且利用常规的电生理及生测方法可以确定挥发物对昆虫行为的影响(Allison and Carde, 2008; Williams *et al*., 2008; Ngumbi *et al*., 2009)。故本研究采用活体植物动态顶空套袋法收集不同危害状态下山核桃释放的挥发物,利用 GC-MS 联用技术、GC-EAD 技术及 Y 型嗅觉仪技术,解析虫害诱导下山核桃不同受害阶段挥发物的组分变化,分离鉴定出对桑天牛产生电生理及行为反应的化合物,为筛选对桑天牛具有生物活性的植物源引诱剂或驱避剂以及开展桑天牛监测预警和设计特异性的防控技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试植物和虫源

试验所用桑天牛成虫和山核桃样树来自于浙江省杭州市临安区玲珑街道雅园村的山核桃苗圃基地(119°38′E, 30°12′N, 平均海拔 113 m),该地区在项目组前期对临安区山核桃危害情况调查的范围,调查的结果显示该地区桑天牛数量最多。山核桃苗圃基地绝大部分是临安山核桃,少数苦楝 *Melia azedarach*,林下仅有杂草无其他植被,林地地势较平坦。其中山核桃树龄 5~20 年,树高 3~15 m,胸径约 8~25 cm,林冠郁闭度约为 0.5。

虫源:利用桑天牛的假死性进行人工捕捉。

1.2 采用动态顶空采集法收集山核桃挥发物

在山核桃林中随机选取健康以及中度桑天牛取食、产卵和钻蛀危害的山核桃(树龄 5~10 年,胸径 10~15 cm,树高 5~15 m)各 3 株并标记,其中每株样树仅存在一种危害状,采用活体植物动态顶空套袋法在同一时间收集不同危害状态下山核桃样树释放的挥发物,采样 6 h(9:00-16:00),重复 3 次。为消除空气中的气体对采集样品的污染,每种危害状态设空白对照样 2 份。

将 Tenax-TA 采样管(长×内径=150 mm×5 mm 的不锈钢管,内填 200 mg 60~80 目 Tenax 吸附剂)(北京劳动保护科学研究所)安装在 TDS-3410 多功能热解吸装置(北京华仪三谱仪器有限责任公司)上,开启氮气,活化温度 300℃,每根管在流速 100 mL/min 下,活化 30 min,最后放入 ATDS-3400 型自动热解吸装置(北京中仪宇盛科技有限公司)上,用与分析样品相同的条件做空白试验(即验证采样管是否老化干净),经气质联用仪检验无干扰残留物质,立即用 Parafilm 封口膜将其两端密封,装入封口袋中并放置在 4℃ 冰箱保存待用。

用无色无味的进口聚乙烯采样袋(长×宽=406 mm×444 mm 的微波专用袋, Reynolds, Richmond, VA, USA)套住山核桃枝条(每个处理枝条大小、部位等尽量保持一致),将袋子下端用封口膜封紧,其中一个硅胶管与活性炭过滤管(长×内径=200 mm×5 mm 的玻璃管,内填 100 mg 20~40 目活性炭吸附剂)(北京劳动保护科学研究所)相连,另一个硅胶管与采样管相连,前者和 QC-1B 大气采样仪(北京劳动保护科学研究所)出口连接,后者和进口连接,气流维持 500 mL/min。采集后立即拔掉采样管并用封口膜将两端密封,装入封口袋。每个挥发物样品用含有以正十二烷(150 μg/L)为内标的色谱纯正己烷洗脱 3 次,每次 500 μL,将淋洗液收集于 4 mL 的螺纹样品瓶中,保存在 -5℃ 冰箱待用,分析时取出,待恢复到常温后进行色谱分析。

1.3 山核桃挥发物成分鉴定

采用 Agilent 6890N-5975N 气相色谱-质谱联用仪(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)对不同危害状态下山核桃挥发物洗脱液进行组分分析。色谱柱是 HP-5MS 毛细管柱(长×内径×膜厚=30 m×0.25 mm×0.25 μm)。每次进样 2 μL,不分流进样。柱温升温程序:40℃ 恒温 1 min,然后以 4℃/min 的速度升温到 220℃ 恒温 3 min,共运行 49 min。溶剂延迟 3 min。检测器温度 280℃,前进样口温度 220℃,四级杆 150℃,离子源温度 230℃,电离方式 EI,质谱轰击电压为 70 eV,扫描质量范围为 35~450 *m/z*。

定性分析通过气质联用仪连接计算机的 NIST08 谱库来自动检索分析组分的质谱数据,并参考标准图谱对全部检索结果进行核对补充检索;定量分析采用峰面积归一化法确定各成分的相对含量。

1.4 桑天牛成虫对不同危害状态下寄主山核桃挥发物的 GC-EAD 反应

在中国科学院动物研究所实验室进行桑天牛雌雄成虫对不同危害状态下山核桃枝条释放的挥发物洗脱液的 GC-EAD 实验。操作步骤:先用锋利的手术刀将活跃的雌、雄桑天牛成虫触角从基部剪下,切除端节的少许末梢,将触角横搭在事先沾有导电胶的叉状电极的两端上,触角两端浸没在导电胶内,最后将叉状电极插入 EAG 探头中。信号先经放大器(UN-06, Syntech),再接到 IDAC 转换器(Auto Spike, IDAC2/3, Syntech),最后接到计算机的硬件采集卡上,通过计算机软件(EAD 版本 2.3, Syntech)采集和分析数据。

GC-EAD 分析采用 Agilent 6890N 气相色谱,色谱柱为 HP-5MS,载气:高纯度氮气,流速 1 mL/min;进样量 2 μL,不分流进样,进样口温度 220℃,氢火焰离子检测器,检测器温度 280℃。升温程序同 GC-MS。测试的样品为不同危害状态下山核桃枝条释放的挥发物洗脱液和对照正己烷溶剂,试虫均为活体成虫,重复 5 次,GC-EAD 色谱图上的化合物的峰形和保留时间进行对比,从而鉴定出对桑天牛雌雄成虫触角产生电生理反应的物质。

1.5　桑天牛成虫对 6 种标准挥发物的嗅觉反应

据桑天牛成虫对不同危害状态下寄主山核桃释放的挥发物的 GC-EAD 反应，选择产生强烈电生理反应的 6 种挥发物（表 1），用 1 mL 液体石蜡作溶剂将各化合物配制成浓度为 1 mol/L，浓度参照毕拥国等（2017）。

表 1　6 种标准挥发物的名称、纯度和来源

Table 1　Name, purity and source of six standard volatiles

化合物 Compounds	纯度 Purity	CAS 号 CAS No.	来源 Source of supply
蒎烯（1*R*）-（+）-alpha-Pinene	99%	7785-70-8	阿拉丁 Aladdin
乙酸叶醇酯 *Cis*-3-hexenyl acetate	98%	3681-71-8	阿拉丁 Aladdin
壬醛 Nonanal	96%	124-19-6	阿拉丁 Aladdin
α-萜品醇 α-Terpineol	≥96%	98-55-5	上海源叶生物科技有限公司 Shanghai Yuanye Bio-Technology Co., Ltd
丙烯酸-2-乙基己酯 2-Ethylhexyl acrylate	≥99%	103-11-7	阿拉丁 Aladdin
正十六烷 Hexadecane	98%	544-76-3	阿拉丁 Aladdin

Y 型嗅觉仪生物测定装置参照 Bertschy 等（1997）、Yang 等（2010, 2011）和王保新等（2014）改进而成。Y 型管主臂长 35 cm，内径 4 cm；两侧臂长约 25 cm，内径 3 cm，夹角 75°（图 1）。测试时，用 100 μL 移液枪吸取 10 μL 有效挥发物和对照液体石蜡分别滴在 2 张 1 cm^2 的定性滤纸上，并置于球形陷阱中。通过硅胶管将活性炭空气过滤装置、QC-1B 型采样仪、蒸馏水加湿瓶、球形陷阱以及 Y 型管相连。由于成虫喜欢在晴天高温时交配和产卵，试验安排在室内 28℃左右进行，空气流速维持在 500 mL/min。每 30 头天牛成虫为一组，每组重复 3 次。每次只放 1 头天牛进行行为选择。每头天牛观察 5 min，将进入选择臂 10 cm 以上并停留超过 30 s 的记为有选择，否则记为无选择。每测试一组就调换 Y 型管两侧的位置，以消除周围环境光照、管臂位置对天牛选择行为产生的影响。测试完后，用酒精彻底清洗干净，晾干后进行下一组的试验。

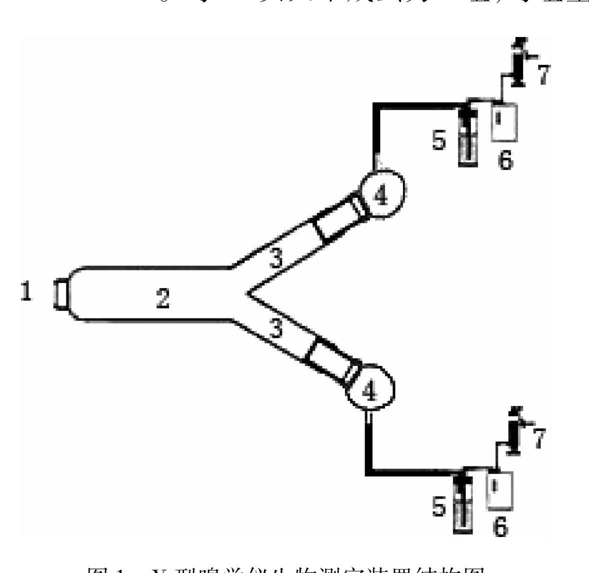


图 1　Y 型嗅觉仪生物测定装置结构图

Fig. 1　Structure diagram of Y-tube olfactometer-based biometric device

1：引虫口 Entomorph；2：主臂 Main arm；3：侧臂 Side arm；4：球形陷阱 Spherical trap；5：蒸馏水加湿瓶 Distilled water humidifying bottle；6：QC-1B 采样仪 QC-1B sampling instrument；7：活性炭过滤装置 Activated carbon filtration unit.

1.6　数据分析

试验数据采用统计软件 SPSS19.0 for Windows 进行分析，不同危害状态下山核桃释放的挥发物之间的差异显著性用方差（ANOVA）分析法，Duncan 氏多重比较法分析各组间的配对比较，用卡方检验来比较桑天牛成虫对不同挥发物行为反应的差异显著性（Hern and Dorn, 2004; Tooker *et al.*, 2005）。通过以下公式来计算引诱率、驱避率和反应率：

$$\text{引诱率}(\%) = \frac{\text{气味臂内的总虫数}}{\text{测试的总虫数}} \times 100\%;$$

$$\text{驱避率}(\%) = \frac{\text{对照臂内的总虫数}}{\text{测试的总虫数}} \times 100\%;$$

$$\text{反应率}(\%) = \frac{\text{气味臂内的总虫数} + \text{对照臂内的总虫数}}{\text{测试的总虫数}} \times 100\%。$$

2　结果

2.1　不同危害状态下山核桃释放的挥发物的成分和相对含量

从表 2 和 3 可知，不同危害状态下山核桃释放的挥发物分别鉴定出 45, 37, 35 和 46 种化合物，共 7 类 51 种，皆以萜烯类和芳香族化合物居多，其中 7 类 33 种挥发物是共有的。不同危害状态下山核桃释放的挥发物的种类有明显差异。健康山核桃释放

表 2 不同危害状态下山核桃释放的挥发物成分及其相对含量

Table 2 Composition and relative contents of volatiles released from *Juglans mandshurica* in different damaged states

化合物 Compounds	CAS 号 CAS No.	相对含量 Relative content (%)			
		健康 Healthy	取食危害 Feeding damage	产卵危害 Oviposition damage	钻蛀危害 Boring damage
芳香族化合物 Aromatic compounds					
甲苯 Toluene	108-88-3	0.276 ±0.041 Bb	0.186 ±0.022 Bc	0.428 ±0.011 Aa	0.296 ±0.010 Bb
乙苯 Ethylbenzene	100-41-4	0.418 ±0.019 Bb	0.259 ±0.023 Bc	0.698 ±0.098 Aa	0.496 ±0.018 ABb
对二甲苯 *p*-Dimethylbenzene	106-42-3	0.959 ±0.051 Cc	0.891 ±0.026 Cc	2.504 ±0.049 Aa	1.577 ±0.043 Bb
对二氯苯 *p*-Dichlorobenzene	106-46-7	0.830 ±0.250 ABa	ND	ND	0.886 ±0.228 Aa
邻异丙基甲苯 1-Isopropyl-2-methylbenzene	527-84-4	0.880 ±0.448 Aa	0.258 ±0.004 Aa	0.916 ±0.083Aa	0.469 ±0.049 Aa
对二乙苯 *p*-Diethylbenzene	105-05-5	4.285 ±1.688 Aa	2.757 ±0.181 Aa	4.406 ±0.655 Aa	5.548 ±0.628 Aa
4-乙基邻二甲苯 4-Ethyl-o-xylene	934-80-5	0.403 ±0.057 Aa	0.114 ±0.012 Aa	0.816 ±0.566 Aa	0.616 ±0.066 Aa
1-烯丙基-2-甲苯 1-Allyl-2-methylbenzene	1587-04-8	ND	ND	ND	0.125 ±0.005
4-甲基茚满 4-Methylindan	824-22-6	ND	ND	ND	0.099 ±0.022
2-甲基-1-苯基-1-丁烯 Benzene, 1-buten-1-yl-	824-90-8	1.106 ±0.005 Aa	ND	ND	0.184 ±0.007 Bb
3,4-二甲基苯乙烯 Styrene, 3,4-dimethyl-	27831-13-6	0.107 ±0.009	ND	ND	ND
1-甲基-4-(1-甲基丙基)-苯 Benzene,1-methyl-4-(1-methylpropyl)	1595-16-0	ND	ND	ND	0.260 ±0.008
萘 Naphthalene	91-20-3	3.151 ±0.334 BCb	1.298 ±0.259 Cc	5.037 ±0.040 ABb	7.828 ±1.178 Aa
五甲基苯 Pentamethyl phenyl	700-12-9	2.469 ±0.247 Aa	0.762 ±0.117 Cb	1.312 ±0.100 BCb	1.487 ±0.500 BCb
4,7-二甲基茚满 4,7-Dimethylindan	6682-71-9	1.067 ±0.014 Bb	0.293 ±0.005 Cd	0.672 ±0.108 BCc	1.684 ±0.138 Aa
1-甲基萘 1-Methylnaphth	90-12-0	5.616 ±0.630 BCa	1.047 ±0.222 Cc	4.008 ±0.135 Bb	6.531 ±0.224 Aa
苯甲酸丁酯 Butyl benzoate	136-60-7	0.902 ±0.015 Cc	0.826 ±0.079 Cc	1.588 ±0.167 Bb	3.729 ±0.056 Aa
2,6-二甲基萘 2,6-Dimethylnaphthalene	581-42-0	5.429 ±0.236 Bb	1.728 ±0.255 Cd	4.563 ±0.163 Bc	6.844 ±0.279 Aa
二苯基甲烷 Diphenylmethane	101-81-5	0.288 ±0.046 ABb	ND	ND	0.518 ±0.107 Aa
3-甲基联苯 3-Phenyltoluene	643-93-6	0.304 ±0.392 Aa	ND	0.201 ±0.012 Bb	0.308 ±0.010 Aa
2,3,5-三甲基萘 2,3,5-Trimethylnaphthalene	2245-38-7	1.063 ±0.049 ABa	0.264 ±0.011 Cb	0.939 ±0.212 ABa	1.533 ±0.308 Aa
2-苯基乙苯 2-Ethylbiphenyl	1812-51-7	ND	0.146 ±0.023 Bb	ND	0.469 ±0.026 Aa
二聚环戊二烯 Dicyclopentadiene	77-73-6	0.637 ±0.104 Aa	0.253 ±0.024 Bb	0.722 ±0.034 Aa	0.562 ±0.047 Aa
六氯苯 Hexachlorobenzene	118-74-1	0.176 ±0.013 Aa	0.247 ±0.062 Aa	0.360 ±0.077 Aa	0.473 ±0.220 Aa
萜烯类 Tetpenes					
蒎烯(1*R*)-(+)-alpha-Pinene	7785-70-8	0.786 ±0.028 Aa	1.558 ±0.021 Aa	1.838 ±0.452 Aa	1.690 ±0.590 Aa
β-蒎烯 Beta-Pinene	127-91-3	16.655 ±0.478 Aa	3.503 ±0.072 Cc	5.589 ±0.010 Bb	5.788 ±0.354 Bb
莰烯 Camphene	79-92-5	0.466 ±0.044 Aa	0.106 ±0.006 Bc	0.204 ±0.006 Bb	0.175 ±0.014 Bbc
月桂烯 Myrcene	123-35-3	13.335 ±0.352 Aa	4.656 ±0.247 Cc	8.588 ±0.806 Bb	8.122 ±0.445 Bb
α-萜品烯 α-Terpinene	99-86-5	0.174 ±0.030 Bb	ND	ND	1.672 ±0.158 Aa
右旋萜二烯(+)-(4*R*)-Limonene	5989-27-5	2.697 ±0.178 Ab	1.145 ±0.010 Bc	3.278 ±0.259 Aa	1.641 ±0.143 Bc
(*E*)-β-罗勒烯 (*E*)-β-Ocimene	3779-61-1	0.856 ±0.472 Cc	53.674 ±0.044 Aa	2.411 ±0.173 Bb	0.466 ±0.025 Cc
罗勒烯 Ocimene	13877-91-3	1.592 ±0.017 Cc	6.526 ±0.030 Aa	20.468 ±2.258 Bb	2.906 ±0.375 Cc
萜品烯 g-Terpinene	99-85-4	0.946 ±0.425 ABa	0.603 ±0.031 ABab	1.093 ±0.030 Aa	ND
3,4-二甲基-2,4,6-辛三烯 3,4-Dimethyl-2,4,6-octatriene	57396-75-5	ND	0.870 ±0.078	ND	ND
樟脑(+)-Camphor	464-49-3	1.104 ±0.028 Ab	0.961 ±0.046 Ab	1.374 ±0.533 Ab	2.339 ±0.211 Aa

续表 2 Table 2 continued

化合物 Compounds	CAS 号 CAS No.	相对含量 Relative content (%)			
		健康 Healthy	取食危害 Feeding damage	产卵危害 Oviposition damage	钻蛀危害 Boring damage
醇类 Alcohols					
(*Z*)-4-己烯-1-醇(*Z*)-Hex-4-en-1-ol	928-91-6	0.296 ±0.023	ND	ND	ND
2-乙基-1-己醇 2-Ethylhexan-1-ol	104-76-7	1.618 ±0.176 ABb	0.941 ±0.049 Cc	2.124 ±0.180 Aab	2.188 ±0.211 Aa
2-苯异丙醇 2-Phenylisopropanol	617-94-7	ND	ND	ND	1.645 ±0.486
α-萜品醇 α-Terpineol	98-55-5	1.654 ±0.363 BCa	0.934 ±0.012 Cb	2.189 ±0.005 Aa	1.817 ±0.026 BCa
酯类 Esters					
乙酸叶醇酯 *Cis*-3-hexenyl acetate	3681-71-8	12.135 ±0.720 Aa	3.356 ±0.897 Bb	6.376 ±1.036 Bb	5.573 ±1.722 Bb
丙烯酸-2-乙基己酯 2-Ethylhexyl acrylate	103-11-7	2.007 ±0.438 BCb	1.583 ±0.064 Cb	1.871 ±0.062 BCb	3.009 ±0.258 Aa
酞酸二甲酯 Dimethyl phthalate	131-11-3	0.331 ±0.022 Bb	ND	ND	2.514 ±0.074 Aa
酮类 Ketones					
苯乙酮 Acetophenone	98-86-2	4.631 ±0.007 bAB	1.931 ±0.407 Cc	4.188 ±0.621 BCb	6.919 ±0.792 Aa
2-甲基-6-亚甲基-1,7-辛二烯-3-酮 2-Methyl-6-methylene-1,7-octadien-3-one	41702-60-7	0.231 ±0.063 Bb	0.530 ±0.016 Aa	ND	ND
异佛尔酮 Isophorone	78-59-1	0.500 ±0.130 Bbc	0.357 ±0.020 Bc	1.408 ±0.177 Aa	0.844 ±0.079 Bb
烃类 Hydrocarbons					
正十一烷 Undecane	1120-21-4	0.166 ±0.266 Aa	ND	ND	0.201 ±0.019 Aa
正十三烷 Tridecane	629-50-5	0.677 ±0.200 Aab	0.324 ±0.020 Ab	0.733 ±0.058 Aab	0.803 ±0.119 Aa
正十四烷 Tetradecane	629-59-4	0.939 ±0.086 Aab	0.734 ±0.257 Ab	1.547 ±0.230 Aa	1.127 ±0.055 Aab
正十六烷 Hexadecane	544-76-3	1.403 ±0.234 Aa	0.971 ±0.190 Aab	0.643 ±0.272 Ab	0.692 ±0.053 Ab
醛类 Aldehydes					
壬醛 Nonanal	124-19-6	5.220 ±0.048 Aa	3.327 ±0.136 Aa	5.120 ±0.715 Aa	4.244 ±1.108 Aa
2,6-二氯苯甲醛 2,6-Dichlorobenzaldehyde	83-38-5	0.197 ±0.003 Ab	ND	ND	0.252 ±0.025 Aa

ND：未检测到 Undetectable. 表中数据是平均值 ± 标准差(n = 3)；数据分析采用 Duncan 氏多重比较法，同一行数据后标有不同大小写字母分别表示天牛不同危害状态下的山核桃释放的挥发物的相对含量差异极显著($P < 0.01$)和差异显著($P < 0.05$)；表 3 同。The data in the table are mean ± standard deviation (n = 3). The data were analyzed using Duncan's multiple range test, and those in a row followed by different capital and small letters indicate extremely significant difference ($P < 0.01$) and significant difference ($P < 0.05$) in the relative contents of volatile constituents released from *J. mandshurica* in different damaged states, respectively. The same for Table 3.

表 3　不同危害状态下山核桃释放的挥发性化合物数量及其相对含量(%)

Table 3　Number of volatile compounds released from *Juglans mandshurica* in different damaged states and their relative contents (%)

化合物 Compounds	健康 Healthy		取食危害 Feeding damage		产卵危害 Oviposition damage		钻蛀危害 Boring damage	
	数目 Number	相对含量 Relative content	数目 Number	相对含量 Relative content	数目 Number	相对含量 Relative content	数目 Number	相对含量 Relative content
芳香族化合物 Aromatic compounds	20	28.729 ±0.146 Bb	16	11.077 ±0.528 Cc	16	28.450 ±1.535 Bb	22	41.812 ±1.778 Aa
萜烯类 Tetpenes	10	38.630 ±0.240 Cc	10	73.601 ±0.037 Aa	9	44.843 ±1.729 Bb	10	24.799 ±0.556 Dd
醇类 Alcohols	3	3.567 ±0.562 ABb	2	1.876 ±0.061 Cc	2	4.313 ±0.177 Aab	3	5.650 ±0.639 Aa
酯类 Esters	3	14.472 ±1.127 Aa	2	4.939 ±0.833 Bc	2	8.247 ±0.974 ABbc	3	11.096 ±1.928 ABab
酮类 Ketones	3	5.362 ±0.174 ABb	3	3.079 ±0.169 Bc	2	5.596 ±0.797 ABb	2	7.763 ±0.870 Aa
烃类 Hydrocarbons	4	3.823 ±0.594 Aa	3	2.094 ±0.290 Ab	3	3.432 ±0.477 Aab	4	3.385 ±0.126 Aab
醛类 Aldehydes	2	5.418 ±0.047 Aab	1	3.328 ±0.136 Ab	1	5.120 ±0.715 Aab	2	5.497 ±1.000 Aa
合计 Total	45	100	37	100	35	100	46	100

的挥发物中 β-蒎烯、月桂烯和乙酸叶醇酯等成分占 42.125%。受到天牛幼虫钻蛀危害的山核桃释放的挥发物与健康山核桃的相似，但种类有部分不同；受到天牛成虫取食危害和产卵危害的山核桃释放的挥

发物中共有成分含量明显上升，分别是(*E*)-β-罗勒烯(53.674%)和罗勒烯(20.468%)。

每种危害状态下山核桃释放的挥发物都有一种或几种特有的成分，且不同危害状态下山核桃释放的挥发物多种成分存在显著性差异。首先，有些挥发物在危害的过程中不再释放，如(*Z*)-4-己烯-1-醇和3,4-二甲基苯乙烯；而新释放了3,4-二甲基-2,4,6-辛三烯、2-苯异丙醇、1-烯丙基-2-甲苯、4-甲基茚满、1-甲基-4-(1-甲基丙基)-苯和2-苯基乙苯等化合物。其次，还有些化合物仅在健康和危害过程的个别状态下释放，如2-甲基-6-亚甲基-1,7-辛二烯-3-酮仅存在于健康和取食危害状态下的山核桃中且取食危害状态极显著高于健康状态；对二氯苯、α-萜品烯、正十一烷、2-甲基-1-苯基-1-丁烯、2,6-二氯苯甲醛、二苯基甲烷和酞酸二甲酯等仅存在于健康和钻蛀危害状态的山核桃中且钻蛀危害状态显著高于健康状态；3-甲基联苯仅不在取食危害状态的山核桃中释放且存在显著性差异；萜品烯仅不在钻蛀危害状态的山核桃中释放且不存在显著性差异；最后，其余33种化合物在健康和天牛不同危害状态下山核桃中均有释放且多数存在显著性差异(表2和3)。

2.2 桑天牛成虫对不同危害状态下寄主山核桃释放的挥发物的 GC-EAD 反应

桑天牛成虫对不同危害状态下山核桃释放的挥发物的GC-EAD反应，根据5次重复实验的图谱，每种危害状态选择一个产生电生理反应较明显且具有重复反应的图谱(图2和3)。

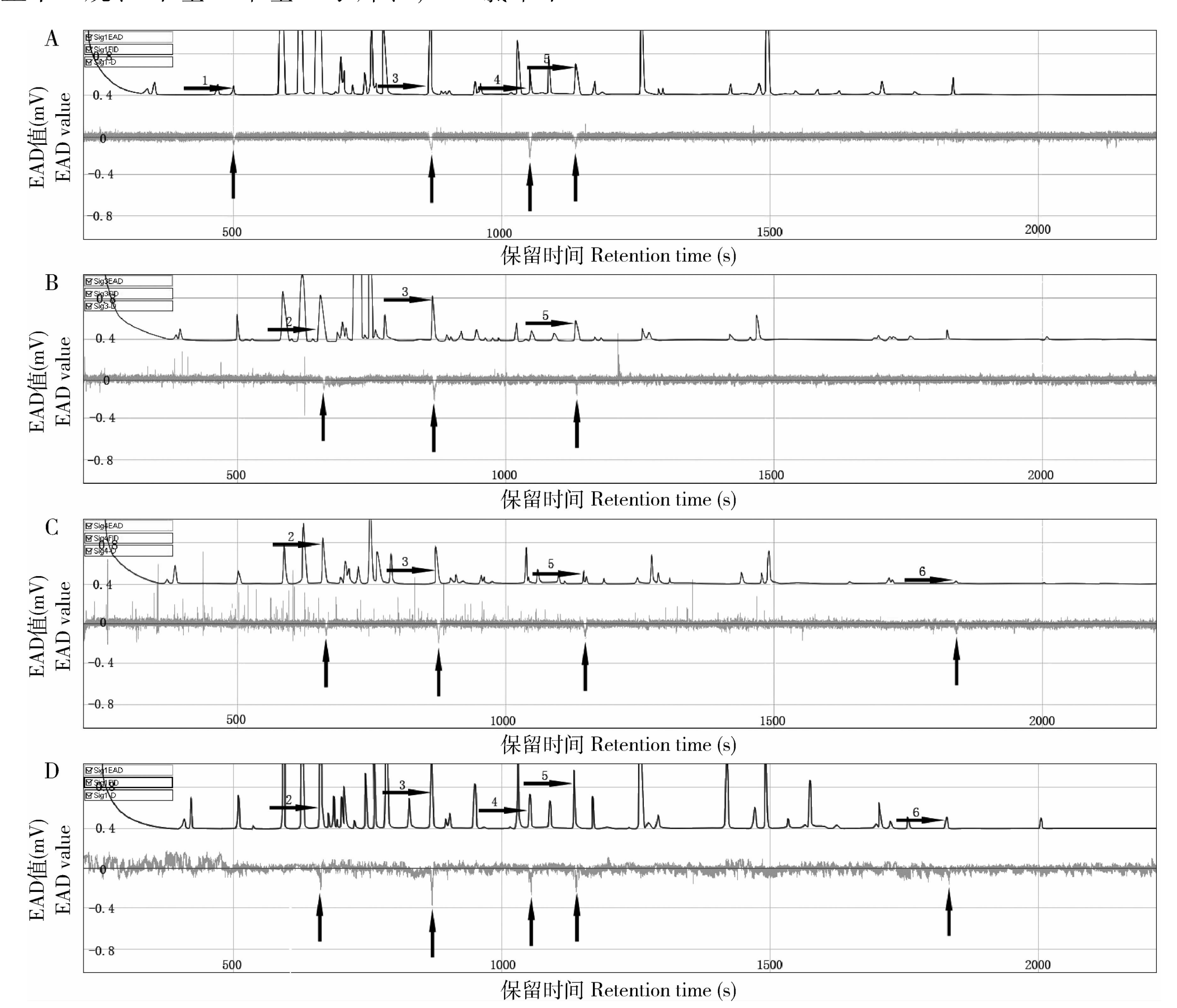


图2 桑天牛雌成虫对不同危害状态下山核桃释放的挥发物的GC-EAD反应图谱

Fig. 2 Responses of female adults of *Apriona germari* to volatiles released from *Juglans mandshurica* in different damaged states detected by GC-EAD

A：健康 Healthy；B：取食危害 Feeding damage；C：产卵危害 Oviposition damage；D：钻蛀危害 Boring damage. 1：蒎烯 (1*R*)-(+)-alpha-Pinene；2：乙酸叶醇酯 *Cis*-3-hexenyl acetate；3：壬醛 Nonanal；4：α-萜品醇 α-Terpineol；5：丙烯酸-2-乙基己酯 2-Ethylhexyl acrylate；6：正十六烷 Hexadecane. 图3同 The same for Fig. 3.

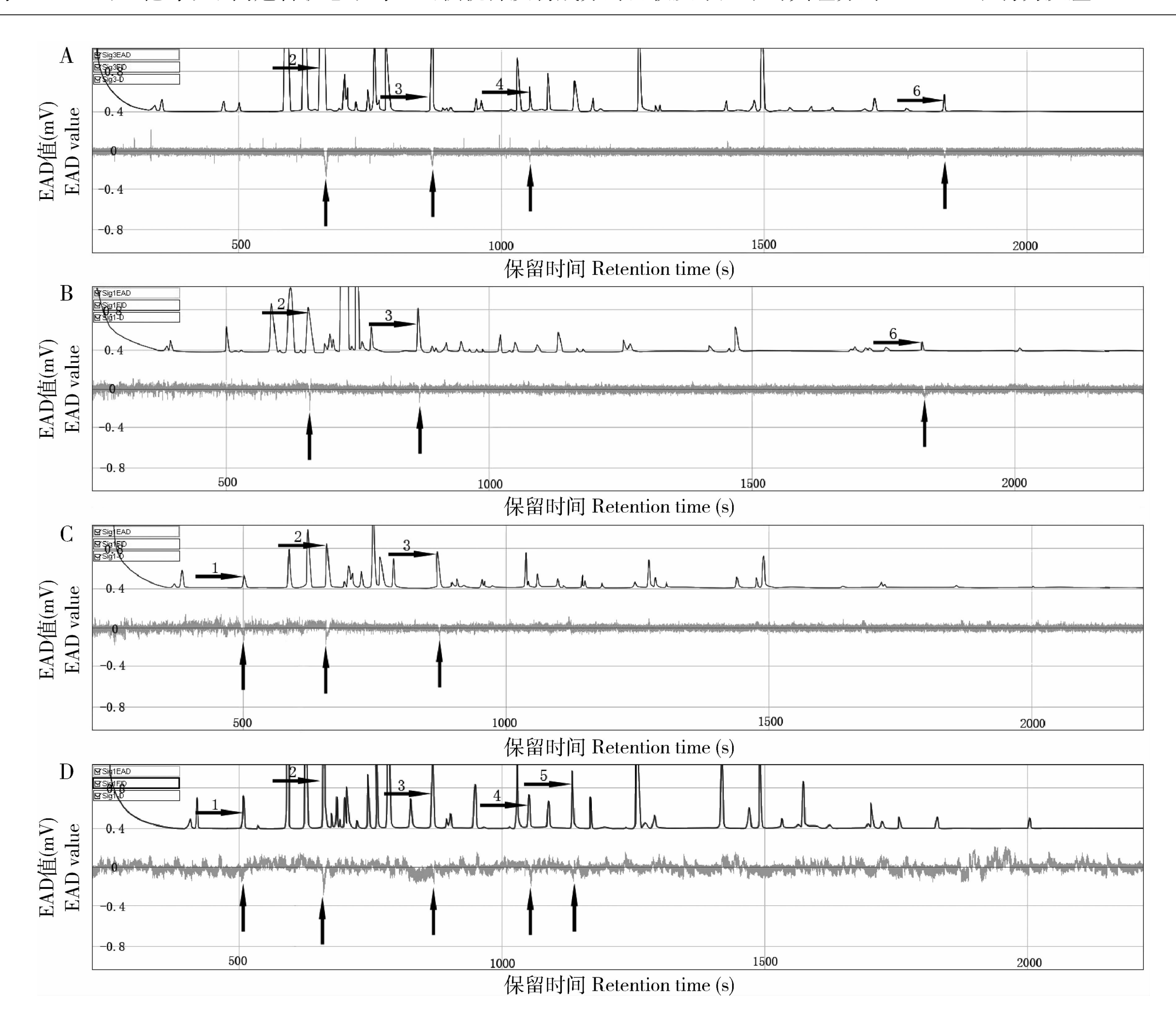


图 3　桑天牛雄成虫对不同危害状态下山核桃释放的挥发物的 GC-EAD 反应图谱

Fig. 3　Responses of male adults of *Apriona germari* to volatiles released from *Juglans mandshurica* in different damaged states detected by GC-EAD

图 2 显示，桑天牛雌成虫对不同危害状态下寄主山核桃释放的挥发物的 GC-EAD 反应有差异。雌成虫的触角仅对健康山核桃释放的挥发物中的蒎烯、壬醛、α-萜品醇及丙烯酸-2-乙基己酯产生反应；雌成虫仅对取食危害状态下山核桃释放的挥发物中的乙酸叶醇酯、壬醛及丙烯酸-2-乙基己酯产生反应；雌成虫仅对产卵危害状态下山核桃释放的挥发物中的乙酸叶醇酯、壬醛、丙烯酸-2-乙基己酯及正十六烷产生反应；雌成虫仅对钻蛀危害状态下山核桃释放的挥发物中的乙酸叶醇酯、壬醛、α-萜品醇、丙烯酸-2-乙基己酯及正十六烷产生反应。

图 3 显示，桑天牛雄成虫对不同危害状态下寄主山核桃释放的挥发物的 GC-EAD 反应有差异。雄成虫的触角仅对健康山核桃释放的挥发物中的乙酸叶醇酯、壬醛、α-萜品醇及正十六烷产生反应；雄成虫对仅取食危害状态下山核桃释放的挥发物中的乙酸叶醇酯、壬醛及正十六烷产生反应；雄成虫仅对产卵危害状态下山核桃释放的挥发物中的蒎烯、乙酸叶醇酯及壬醛产生反应；雄成虫仅对钻蛀危害状态下山核桃释放的挥发物中的蒎烯、乙酸叶醇酯、壬醛、α-萜品醇及丙烯酸-2-乙基己酯产生反应。

综上，桑天牛雌雄成虫的触角仅对蒎烯、乙酸叶醇酯、壬醛、α-萜品醇、丙烯酸-2-乙基己酯及十六烷产生显著的电生理反应，对其他挥发物无反应，而雌雄成虫主要差别在于雌成虫对壬醛产生电生理反应较大，而雄成虫对乙酸叶醇酯反应较大，对其他挥发物的反应差别不大。

2.3　桑天牛成虫对 6 种化合物的行为反应

嗅觉反应结果显示，桑天牛成虫对这 6 种化合物有较高的反应率且大于 92.22%。卡方检验结果显示，壬醛和丙烯酸-2-乙基己酯对桑天牛雌成虫产生显著的引诱作用（$P < 0.05$），雌成虫对其选择率

分别是73.33%和70.00%，而α-萜品醇对其产生显著的驱避作用（$P<0.05$），雌成虫对其选择率仅27.78%，其他3种物质对桑天牛雌成虫没有产生显著的引诱或驱避作用（表4）；桑天牛雄成虫对乙酸叶醇酯产生极显著的趋性（$P<0.01$），对壬醛和α-萜品醇产生显著的趋性（$P<0.05$），其中乙酸叶醇酯和壬醛对其产生显著的引诱作用，雌成虫对其选择率分别是72.22%和70.00%，而α-萜品醇则对其产生显著的驱避作用，雌成虫对其选择率仅26.67%；其他3种物质对桑天牛雄成虫没有产生显著的引诱或驱避作用（表5）。这表明对桑天牛成虫产生电生理反应的挥发物不一定会对桑天牛产生显著行为反应，而且雌雄成虫之间表现出部分不同，这可能是桑天牛触角的性二型导致的差异。

表4 桑天牛雌成虫对6种标准挥发物的行为反应

Table 4 Behavioral responses of female adults of *Apriona germari* to six standard volatiles

化合物 Compounds	引诱率（%） Luring rate	驱避率（%） Repellent rate	卡方检验 *Chi*-square test	反应率（%） Response rate
蒎烯（1*R*）-（+）-alpha-Pinene	30.00	67.78	3.64 n.s.	97.78
乙酸叶醇酯 *Cis*-3-hexenyl acetate	66.67	33.33	2.70 n.s.	100.00
壬醛 Nonanal	73.33	26.67	5.63 *	100.00
α-萜品醇 α-Terpineol	27.78	64.44	4.06 *	92.22
丙烯酸-2-乙基己酯 2-Ethylhexyl acrylate	70.00	26.67	4.96 *	96.67
正十六烷 Hexadecane	34.44	60.00	1.62 n.s.	94.44

n.s. 无显著差异 Non-significant defference（$P>0.05$）；* 显著差异 Significant difference（$P<0.05$）；** 极显著差异 Extremely significant difference（$P<0.01$）. 表5同 The same for Table 5.

表5 桑天牛雄成虫对6种标准挥发物的行为反应

Table 5 Behavioral responses of male adults of *Apriona germari* to six standard volatiles

化合物 Compounds	引诱率（%） Luring rate	驱避率（%） Repellent rate	卡方检验 *Chi*-square test	反应率（%） Response rate
蒎烯（1*R*）-（+）-alpha-Pinene	36.67	63.33	2.42 n.s.	100.00
乙酸叶醇酯 *Cis*-3-hexenyl acetate	72.22	21.11	7.40 **	93.34
壬醛 Nonanal	70.00	30.00	4.03 *	100.00
α-萜品醇 α-Terpineol	26.67	66.67	4.40 *	93.34
丙烯酸-2-乙基己酯 2-Ethylhexyl acrylate	64.44	34.44	2.16 n.s.	98.88
正十六烷 Hexadecane	30.00	67.78	3.64 n.s.	97.78

3 结论与讨论

有少数学者曾对山核桃的树皮、树干、树叶、枝条、虫害致衰株和机械损伤植株等做过挥发物成分的相关报道，如卓志航等（2016）研究发现云斑天牛寄主核桃树皮和树叶释放的挥发物多为萜烯类，如β-蒎烯、蒎烯和左旋-β-蒎烯等；朱宁等（2017）发现星天牛和光肩星天牛寄主山核桃释放的挥发物主要成分是α-蒎烯和罗勒烯。山核桃挥发物主要是萜烯类化合物，这与各学者的研究结果类似，但在一些次要或微量成分上存在较大差异（陈友吾等，2015；张冬勇等，2016）。研究结果不完全相同，可能是各学者采样的部位、时间和方法及样树的龄期和立地条件有差异（宁眺等，2006；伍苏然等，2012）。

桑天牛成虫仅对在不同危害状态下山核桃释放的挥发物中的蒎烯、乙酸叶醇酯、壬醛、α-萜品醇、丙烯酸-2-乙基己酯及十六烷这6种挥发物有显著的电生理反应，并且桑天牛成虫对不同危害状态下山核桃释放的挥发物中的这6种挥发物存在种类和程度上不同的电生理反应。这可能与这6种挥发物虽然在不同危害状态下山核桃中均有释放，但相对含量有差异相关。因为有报道认为植食性昆虫对同一物质的不同浓度可以表现出不同的电生理反应（Yang *et al.*，2010），这说明植物挥发物的种类、浓度及各挥发物之间的比例可能是影响昆虫反应的重要因素。

嗅觉反应结果显示：丙烯酸-2-乙基己酯仅对桑天牛雌成虫有显著的引诱作用；乙酸叶醇酯仅对桑天牛雄成虫有极显著的引诱作用；壬醛对桑天牛雌

雄成虫均有显著的引诱作用；α-萜品醇对桑天牛雌雄成虫均有显著的驱避作用，这与 GC-EAD 反应结果相符，基本是试虫的电生理反应越强越有可能表现显著的行为反应。这与一些学者的研究结果相似，如毕拥国等(2017)报道，壬醛、丙烯酸-2-乙基己酯和 *Z*-乙酸-3-己烯酯在测试的 5 种植物源挥发物及混合物中对桑天牛成虫均产生较强的 EAG 反应和较好的引诱作用，其中(*Z*)-乙酸-3-己烯酯和乙酸叶醇酯结构相似。嗅觉试验中桑天牛雌雄成虫对挥发物表现的行为反应有差异，据报道桑天牛在寻找寄主阶段主要通过嗅觉感受器对寄主植物特异性的化学指纹图谱的识别到达植物(Barata *et al.*, 2002)，说明这可能与桑天牛雌雄成虫的触角上感受器的种类、分布模式及数量的差异有关。Tooker 等(2005)发现香草烯对黄峰 *Antisrophus rufus* 没有产生明显的引诱或驱避作用，但其能够增强其他挥发物的引诱作用，说明植物挥发物的某一挥发物本身可能对植食性昆虫没有明显的行为作用，但其的存在可能会增强或者抑制其他挥发物的作用。如嗅觉反应中的蒎烯、十六烷，虽然对桑天牛没有明显的引诱或驱避作用，但其作用不可忽视。

昆虫对植物挥发性气体的识别是一个非常复杂的辨认过程，单一挥发物对桑天牛的行为反应还不足以配制植物源引诱剂或驱避剂，那么将不同有效成分按照特定比例混配进行下一步野外诱捕试验是今后研究的重点，然而确定不同有效成分间的最佳配比是难点。

参考文献(References)

Allison JD, Borden JH, Seybold SJ, 2004. A review of the chemical ecology of the Cerambycidae (Coleoptera). *Chemoecology*, 14(3-4): 123-150.

Allison JD, Carde RT, 2008. Male pheromone blend preference function measured in choice and no-choice wind tunnel trials with almond moths, *Cadra cautella*. *Anim. Behav.*, 75(1): 259-266.

Barata EN, Mustaparta H, Pickentt JA, Wadhams LJ, Araujo J, 2002. Encoding of host and non-host plant odours by receptor neurons in the eucalyptus woodborer, *Phoracantha semipunctata* (Coleoptera: Cerambycidae). *J. Comp. Physiol.*, 188(2): 121-133.

Bertschy C, Turlings TCJ, Bellotti AC, Dorn AS, 1997. Chemically-mediated attraction of three parasitoid species to mealybug-infested cassava leaves. *Fla. Entomol.*, 80(3): 383-395.

Bi YG, Guo L, Wang ZG, Lv F, Yan AH, 2017. Electroantennogram and behavioral responses of *Apriona germari* to five plant volatiles and their mixtures. *Sci. Sericult.*, 43(1): 32-38. [毕拥国，郭丽，王志刚，吕飞，阎爱华，2017. 桑天牛对5种植物源挥发性化合物及其混合物的触角电位和行为反应. 蚕业科学，43(1): 32-38]

Chen YW, Shen JJ, Ye HL, Zhu TJ, 2015. Comparison and analysis of volatile substances in leaves of *Carya illinoensis* and *C. cathayensis*. *J. Zhejiang For. Sci. Technol.*, 35(2): 8-12. [陈友吾，沈建军，叶华琳，朱汤军，2015. 美国山核桃与山核桃叶片挥发物的比较和分析. 浙江林业科技，35(2): 8-12]

Hern A, Dorn S, 2004. A female-specific attractant for the codling moth, *Cydia pomonella*, from apple fruit volatiles. *Naturwissenschaften*, 91(2): 77-80.

Li JQ, Fan H, Jin YJ, 2003. Behavior response of *Anoplophora glabripennis* (Motsh.) to the mechanical-wounded and herbivore-fed *Acer negundo* L. *J. Beijing For. Univ.*, 25(5): 42-46. [李继泉，樊慧，金幼菊，2003. 光肩星天牛对损伤后复叶槭植株的行为反应. 北京林业大学学报，25(5): 42-46]

Müller C, Hilker M, 2000. The effect of a green leaf volatile on host plant finding by larvae of herbivorous insect. *Naturwissenschafen*, 87(5): 216-219.

Ngumbi E, Chen L, Fadamiro HY, 2009. Comparative GC-EAD responses of a specialist (*Microplitis croceipes*) and a generalist (*Cotesia marginiventris*) parasitoid to cotton volatiles induced by two caterpillar species. *J. Chem. Ecol.*, 35(9): 1009-1020.

Ning T, Fan JT, Fang YL, Sun JH, 2006. Change incontent of host volatile terpene under different damaged states and eletroantennogram response of *Monochamus alternatus* Hope to these volatiles. *Acta Entomol. Sin.*, 49(2): 179-188. [宁眺，樊建庭，方宇凌，孙江华，2006. 不同危害状态下寄主萜烯类挥发物含量的变化及松墨天牛对其组分的触角电位反应. 昆虫学报，49(2): 179-188]

Paré PW, Tumlinson JH, 1999. Plant volatiles as a defense against insect herbivores. *Plant Physiol.*, 121(2): 325-331.

Pichersky E, Gershenzon J, 2002. The formation and function of plant volatiles: perfumes for pollinator attraction and defense. *Curr. Opin. Plant Biol.*, 5(3): 237-243.

Tooker JH, Crumrin AL, Hanks LM, 2005. Plant volatiles are behavioral cues for adult females of the gall wasp *Antistrophus rufus*. *Chemoecology*, 15(2): 85-88.

Wang BX, Yang H, Yang W, Yang CP, Cai Y, Zhou M, He XH, 2014. EAG and behavioral responses of *Batocera lineolata* Chevrolat (Coleoptera: Cerambycidae) to ten plant volatiles. *Chin. J. Appl. Entomol.*, 51(2): 481-489. [王保新，杨桦，杨伟，杨春平，蔡艳，周梦，何晓华，2014. 云斑天牛对10种植物挥发物的 EAG 和行为反应. 应用昆虫学报，51(2): 481-489]

Wang HW, Yang W, Yang H, Yang CP, Zhu XQ, Liu FJ, Jiang LH, Shan CY, 2014. Electroantennogram and behavioral responses of *Tomicus minor* (Hartig) (Coleoptera: Scolytidae) to plant volatiles. *Chin. J. Ecol.*, 33(5): 1260-1266. [王红伟，杨伟，杨桦，杨春平，朱晓庆，刘峰建，蒋丽华，山春燕，2014. 横坑切梢小蠹对植物挥发物的电生理和行为反应. 生态学杂志，33(5): 1260-1266]

Williams L, Rodriguez-Saona C, Castle SC, Zhu S, 2008. EAG-active herbivore-induced plant volatiles modify behavioral responses and

host attack by an egg parasitoid. *J. Chem. Ecol.*, 34(9): 1190－1201.

Wu SR, Zhang SY, Xiong GR, Hu CH, Xiao C, 2012. Analysis of volatile constituents in pine logs from *Pinus yunnanensis* under different physiological states. *J. Northeast For. Univ.*, 40(10): 115－119. [伍苏然, 张淑颖, 熊国如, 胡纯华, 肖春, 2012. 不同生理状态云南松木段挥发物化学成分比较. 东北林业大学学报, 40(10): 115－119]

Yan SC, Zhang DD, Chi DF, 2003. Advances of studies on the effects of plant volatiles on insect behavior. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 14(2): 310－313. [严善春, 张丹丹, 迟德福, 2003. 植物挥发物对昆虫作用的研究进展. 应用生态学报, 14(2): 310－313]

Yang H, Yang W, Yang MF, Yang CP, Yang LG, Xutang XK, 2011. Diurnal rhythm of *Viburnum odoratissinum* and *Betula luminifera* volatiles and electroantennogram response of *Batocera horsfieldi*. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 22(2): 357－363. [杨桦, 杨伟, 杨茂发, 杨春平, 杨令国, 徐唐鑫科, 2011. 法国冬青和光皮桦挥发物日节律及云斑天牛的触角电位反应. 应用生态学报, 22(2): 357－363]

Yang H, Yang W, Liang XY, Yang MF, Yang CP, Zhu TH, Wu XL, 2011. The EAG and behavioral responses of *Batocera horsfieldi* (Coleoptera: Cerambycidae) to the composition of volatiles. *J. Kansas Entomol. Soc.*, 84(3): 217－231.

Yang H, Yang W, Yang MF, Yang CP, Zhu TH, Huang Q, 2010. Effects of plant volatiles on the EAG and behavioral responses of *Batocera horsfieldi* Hope (Coleopter: Cerambycidae). *J. Agric. Urban Entomol.*, 27(1): 20－32.

Zhang DY, Liu JD, Wang JY, Zhu N, Xu HC, Fan JT, 2016. Two plant compound lures for trapping *Batocera horsfieldi* (Hope) in the field. *Chin. J. Appl. Entomol.*, 53(4): 856－863. [张冬勇, 柳建定, 王菊英, 朱宁, 徐华潮, 樊建庭, 2016. 两种对云斑天牛有林间诱捕效果的植物源物质. 应用昆虫学报, 53(4): 856－863]

Zhang DY, Zhou SY, Zhu N, Fan JT, 2017. Damage investigation and an identification method for different species of *Carya cathayensis* longhorned beetles. *J. Zhejiang A&F Univ.*, 34(1): 42－49. [张冬勇, 周书永, 朱宁, 樊建庭, 2017. 山核桃天牛危害调查及种类的鉴别方法. 浙江农林大学学报, 34(1): 42－49]

Zhang L, Wang BD, Xu ZC, 2011. Volatile constituents of four moraceous host plants of *Apriona germari*. *Acta Ecol. Sin.*, 31(24): 7479－7485. [张琳, Wang BD, 许志春, 2011. 桑科中4种桑天牛寄主植物的挥发物成分研究. 生态学报, 31(24): 7479－7485]

Zhu N, Zhang DY, Wu LP, Hu Q, Fan JT, 2017. Attractiveness of aggregation pheromones and host plant volatiles to *Anoplophora glabripennis* and *A. chinensis* (Coleoptera: Cerambycidae). *Acta Entomol. Sin.*, 60(4): 421－430. [朱宁, 张冬勇, 吴利平, 胡琴, 樊建庭, 2017. 聚集信息素和寄主植物挥发物对光肩星天牛和星天牛的引诱作用. 昆虫学报, 60(4): 421－430]

Zhuo ZH, Yang W, Xu DP, Yang CP, Yang H, Liu CS, 2016. Volatile components in bark and leaf of host plants *Juglans regia* L. of *Batocera lineolata* Chevrolat. *J. Northwest A&F Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 44(5): 205－214. [卓志航, 杨伟, 徐丹萍, 杨春平, 杨桦, 刘臣山, 2016. 云斑天牛寄主核桃树皮及树叶的挥发物. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 44(5): 205－214]

(责任编辑: 赵利辉)